

Глобальная геодезическая система GGOS и ее научное значение

С.К. Татевян

*Институт астрономии РАН
119017, Москва, Пятницкая, 48
E-mail: statev@inasan.ru*

Глобальная Геодезическая Система Наблюдений (GGOS) развертывается под эгидой Международной Геодезической Ассоциации. Основное назначение этой интегрированной системы – обеспечение стабильности и мониторинга трех фундаментальных компонент современной геодезии, а именно: геометрической формы и деформаций Земли, параметров ее ориентации и вращения, гравитационного поля Земли и его временных изменений. По мере своего полного развертывания (вплоть до 2020 г.) GGOS будет использоваться для контроля общеземной геоцентрической системы координат, стабильности положения центра масс планеты и масштаба сети, что необходимо для изучения различного рода деформаций земной коры и глобальных изменений, включая сейсмическую и вулканическую активность, тектонику плит, изменений объема внутренних вод. Высокоточные системы координат необходимы также для прогнозирования орбит низкоорбитальных исследовательских спутников. Распределение земных масс и их перемещения в теле твердой Земли проявляются в изменяемых параметрах ориентации и вращения Земли. На изменения этих параметров существенно влияют также любые движения, происходящие в атмосферных и океанических массах, изучение которых чрезвычайно важно для понимания глобальных изменений климата и уровня Мирового океана. Определение и мониторинг этих изменений с суб-сантиметровой точностью и практически в реальном времени стали возможным только с использованием современных методов космической геодезии. Основными техническими средствами, составляющими систему GGOS, являются спутниковые навигационные системы, лазерная локация ИСЗ, радио-интерферометрия со сверх длинной базой, орбитографическая спутниковая система ДОРИС, а также специальные космические аппараты для измерения гравитационного поля Земли и исследований атмосферы. В настоящее время средствами космической геодезии уже получены уникальные данные, необходимые для построения усовершенствованных геофизических и динамических моделей в системе планеты Земля.

Ключевые слова: космическая геодезия, мониторинг глобальных изменений, интегрированная система наблюдений.

Современные достижения космической геодезии

Для астрономии, геофизики, геологии, метеорологии, биологии и многих других наук применение искусственных спутников и космических аппаратов знаменует качественно новый этап развития. Эти новые летающие исследовательские лаборатории - позволяют ставить и решать задачи, которые до запуска спутников были бы немыслимы.

Первые эксперименты по использованию наблюдений ИСЗ для геодезических определений были проведены еще в начале 60-х годов прошлого столетия и дали импульс к развитию новой науки, получившей название спутниковая или космическая геодезия. Важным преимуществом этого нового космического направления в области наук о Земле является его глобальность. За прошедшие 50 лет теоретические основы и технические средства космической геодезии развивались очень динамично. С каждым новым достижением расширялись сферы применения получаемых результатов, как в прикладных исследованиях, так и при решении фундаментальных задач астрономии, геофизики и геологии.

Наиболее существенное увеличение точности измерений в космической геодезии наблюдается последние 20 лет. Лазерная локация спутников, оснащенных специальными отражателями, достигла сантиметровых точностей при полностью автоматизированных системах наведения и слежения за спутниками. Кроме того, быстрое развитие радиотехнических спутниковых навигационных систем, таких как GPS и ГЛОНАСС, полностью изменили подход к задачам определения динамических и физических свойств Земли и позволили значительно повысить точности определения геоцентрических координат наземных пунктов и их изменений со временем.

Определение параметров вращения Земли и движений центра масс Земли

Весьма важной задачей, решаемой в настоящее время исключительно средствами космической геодезии, является определение и мониторинг коротко периодических вариаций скорости вращения Земли и ее ориентации в пространстве, поскольку эти параметры определяют систему Всемирного времени и необходимы для связи инерциальной (небесной) и геоцентрической (земной) систем координат. В табл.1 показано, насколько изменились точности определения параметров вращения Земли (на 5 дневных интервалах) за период 1962-2005гг. Современная Международная служба вращения Земли определяет и регулярно публикует данные о параметрах ориентации Земли с точностью 1 см в положении полюса и около 0,3 миллисекунд по времени, что равноценно 1.4 см на экваторе. При этом относительные координаты наземных пунктов и длины базисов на расстояниях до нескольких сотен или тысяч км определяются с ошибками 1-5 мм по горизонтали и менее 1.0 см по вертикали.

Таблица 1. Точность определения параметров вращения Земли (на 5 дневных интервалах) за период 1962-2005.

(X,Y –координаты полюса оси вращения, UT1-Всемирное время,
 $\psi\delta$, $\epsilon\delta$ -прецессия и нутация оси вращения)

Годы	$\sigma(X)$	$\sigma(Y)$	$\sigma(UT1)$	$\sigma(\psi\delta)$	$\sigma(\epsilon\delta)$
--	--	--	--	--	--
Единицы	0.001''	0.001''	0.0001s	0.001''	0.001''
1962-1967	30	30	20	-	-
1968-1971	25	25	17	-	-
1972-1979	11	11	10	-	-
1980-1983	2	2	3	2	1
1984-1989	.40	.40	.20	.5	.2
1990-2000	.20	.20	.20	.3	.1
2001-2005	.15	.15	.1	.3	.1

По мере увеличения разрешения и точности космических геодезических измерений появилась возможность регистрировать все меньшие по мощности колебания определяемых параметров с более высокой частотой. Выявлены устойчивые колебания в движении полюса Земли с периодами от нескольких недель до 1 года и получены корреляционные зависимости этих колебаний с изменениями приземного атмосферного давления. Экспериментально подтверждена связь Чандлеровского (период 436 дней) и годового возмущения в движении полюса с глобальными перемещениями атмосферных масс и гидрологическими циклами. С высокой точностью определены коэффициенты нутации (характеризующие движение оси вращения Земли в инерциальной системе координат), что необходимо для изучения внутреннего строения Земли и свободной нутации ее жидкого внешнего ядра.

По результатам ежегодных переопределений координат станций глобальных сетей наблюдений ИСЗ показано, что положение центра масс Земли, которое принимается за исходное начало системы координат, испытывает периодические колебания с небольшими амплитудами (3-

10 мм) и имеет вековое смещение порядка 1.5-2.0 мм (рис. 1). Интерпретация вариаций «геоцентра» и долгопериодических флуктуаций угловой скорости Земли (т.е. продолжительности суток) возможно также должна быть увязана с созданием совершенных моделей внутреннего строения планеты. И эти исследования продолжают по мере накопления наблюдательного материала [2].

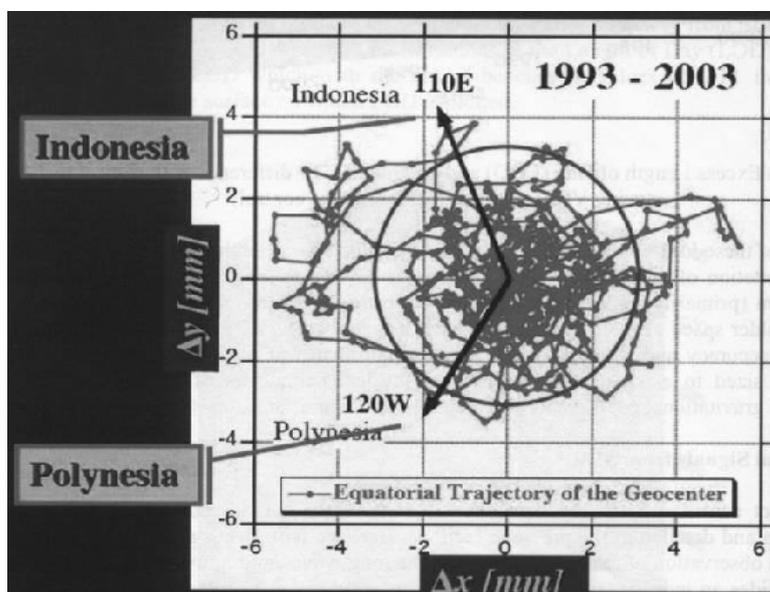


Рис. 1. Экваториальная траектория движения геоцентра по результатам уравнивания сети ITRF с 1993 по 2003 годы.
Черные стрелки – сильные отклонения в период Эль-Ниньо

Исследования структуры гравитационного поля Земли

Гравитационное поле Земли до 1957 года было известно с точностью до третьего коэффициента в разложении гравитационного потенциала, т.е. с точностью до сжатия Земли (1/298). Первые детальные модели гравитационного поля Земли, построенные по результатам наблюдений спутников с использованием дополнительной информации из высотометрических и наземных гравиметрических измерений, содержали около 150 коэффициентов в разложении гравитационного потенциала. Это означает, что благодаря спутниковой геодезии, внешняя форма нашего земного шара стала известна в сотни раз лучше, чем до 1957 года.

Применение новых технологий наблюдения спутников сделало возможным реализовать дифференциальный метод определения гармоник геопотенциала и получить более детальную структуру гравитационного поля с разрешением 200-300 км. В проекте «CHAMP»(2000 г) впервые была применена методика «спутник-спутник» в режиме «высокий-низкий» [2]. Спутник имеет на борту GPS приемник и акселерометр, систему поддержания ориентации спутника и параметров орбиты, лазерные отражатели, сенсор ориентации и т.д. Информация, полученная с этого спутника, кардинально изменила подход к решению проблемы определения гравитационного поля. Было построено несколько моделей по разному набору измерительных данных. В результате «уровенная» поверхность Земли (геоид) определена с точностью 10 см и пространственным разрешением 350 км. (55 гармоник геопотенциала). Более высокая 1-сантиметровая точность геоида получена с разрешением 1000 км.

Другой успешный запуск спутников для определения временных изменений гравитационного поля был осуществлен в 2002 году. В проекте GRACE [3] реализована методика «спутник-спутник» с использованием новейших технологий. Одна из основных научных задач, стоящих перед этим проектом, это регистрация сигналов климатических изменений, вызываемых

крупно масштабными (несколько сотен километров на временных интервалах более 1 месяца) перемещений земных масс. Два идентичных спутника на одной орбите оснащены дальномерной системой, включающей микроволновый К-частотный дальномер для измерения вариаций расстояния между парой спутников с высокой точностью 1 микро метр в секунду. Эти вариации напрямую зависят от действующих на спутники аномалий гравитационного поля. Кроме того, координаты и скорость движения этих спутников измеряется системой GPS. Данные поступают на приемные станции в Германии и США, где предварительно обрабатываются и передаются для дальнейшего анализа в научные центры.

Новые детализированные модели гравитационного поля позволяют выявить тонкие особенности тектонической структуры Земли, которые раньше не проявлялись в глобальных спутниковых моделях. Эти особенности являются следствием различных геофизических процессов в активных тектонических зонах субдукции, коллизии и растяжения плит, таких как, например, Гималайско-Тибетский регион и Срединно-Атлантический хребет. В существующих до настоящего времени моделях геопотенциала зоны субдукции проявлялись только как обширные области с высокими гравитационными аномалиями вследствие увеличения объема масс при подвиге слоев земной коры под вулканические дуги. Более детальные особенности тектонических структур обнаруживались только при локальных гравиметрических измерениях наземными средствами или с морских судов.

Разработанный в Европейском космическом агентстве третий космический проект GOCE [4] направлен на изучение тонкой структуры гравитационного поля Земли. В его основе заложен принцип градиентометрии, то есть измерения градиентов гравитационного ускорения. Такая технология также реализована впервые. Ожидается, что в результате осуществления этого эксперимента можно будет построить модель с разрешением 1 градус, 1-сантиметровой точностью определения геоида и с ошибкой ± 1 мГал в аномалиях силы тяжести.

Перечисленные выше эксперименты открывают новые пути исследований гравитационного поля Земли и изучения ее внутреннего строения. Это может послужить основой для создания непрерывной службы, обеспечивающей ученых и специалистов во многих отраслях фундаментальной и прикладной науки информацией о временных изменениях геопотенциала и динамических параметров Земли.

Геодинамические исследования

Для изучения механизмов возникновения разрушительных геодинамических явлений, в том числе для определения мест подготовки сильных землетрясений, извержений вулканов и некоторых других природных катастроф, очень важно иметь возможность выделить области, где происходят максимальные изменения скоростей. Поскольку эти смещения проявляются на уровне сантиметров или даже нескольких миллиметров, то точность измерений должна быть соответствующей. Опыт последних лет показал, что технология спутниковой геодезии, включая глобальные навигационные системы (GNSS) и лазерные измерения дальностей, является наиболее эффективным (по точности и экономичности) средством для регистрации и мониторинга сдвиговых деформаций и вертикальных движений земной коры [5, 6]. С помощью этой технологии впервые получены количественные оценки, подтверждающие концепцию глобальных и региональных тектонических движений и деформаций, которые являются прямыми индикаторами современных (за последние 20 лет) динамических процессов в земной коре и мантии, и которые до сего времени было абсолютно невозможно количественно оценить на коротких интервалах времени (рис. 2).